

УДК 502/504:624.041:624.13

М. А. МИХАЛЕВ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕСТНОГО РАЗМЫВА РУСЛА ЗА ВОДОСБРОСАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Обсуждаются трудности физического моделирования местного размыва русла за водосбросами в несвязных мелкозернистых грунтах. Грунт на модели из-за необходимости уменьшения размеров частиц может относиться к категории связных, в то время как в натуре он несвязный. Существует такая категория грунтов, которые в мелкодисперсном состоянии остаются несвязными, например, кварцевые порошки. Используя на модели такие грунты, можно при решении практических задач преодолеть эти трудности. Обладая малыми размерами частиц, использование этих частиц может расширить возможности исследований местных размывов русла за водосбросами на равнинных реках. Отмечается, что, используя на модели приемлемых размеров мелкодисперсный кварцевый порошок, можно изучать образование воронки местного размыва в натуральных гравийных грунтах. Чтобы подобного рода исследования можно было отождествлять с натурными условиями песчаных грунтов, необходим поиск сыпучих материалов, обладающих прочностью кварца, но малой по сравнению с кварцем плотностью.

Водосброс, местный размыв русла, несвязные и связные грунты, физическое моделирование, числа и критерии подобия, глубина воронки размыва.

There are discussed difficulties of physical simulation of the local channel erosion downstream spillways in non-cohesive fine-grained soils. The material in the model may be cohesive, in nature it can be non-cohesive. There exists such a category of soils which in a small-dispersed condition remains non-cohesive, for example, quartz powders. Using such soils in the model we can overcome these difficulties when solving practical tasks. Having particles of small sizes their usage can widen the possibilities of investigations of local channel erosions downstream spillways on lowland rivers. It is stated that using a fine-dispersed quartz powder on the models we can study formation of the local erosion depth in natural gravel soils. In order to identify researches of this kind with the natural conditions of sand soils it is necessary to search for loose materials which have the strength of quartz but smaller density in comparison with quartz.

Spillway dams, channel erosion, non-cohesive and cohesive materials, physical simulation, numbers and criteria of similarity, depth of the local erosion.

Методика физического моделирования местного размыва русла за водосбросными плотинами в несвязных грунтах разработана в [1, 2]. В ней обосновано утверждается, что перенос в натуре максимальной глубины воронки размыва и среднего размера частиц несвязного грунта в соответствии с линейным масштабным коэффициентом возможен только в области квадратичного сопротивления и потока и процесса обтекания потоком частиц грунта. Эта

область сопротивления наблюдается на модели при движении воды в русле, сложенным несвязным грунтом, размер частиц которого превышает 1 мм. Такому грунту в натуре в зависимости от масштабного линейного коэффициента будет соответствовать либо гравий, либо галька, либо грунты с большими размерами отдельностей. Следовательно, речь может идти только о моделировании местного размыва русла за сооружениями, расположенными на реках

предгорной или горной местности.

Руслу равнинных рек, как правило, сложены песками различной крупности. При моделировании местных размывов за сооружениями, расположенных на этих реках, размеры частиц грунта в условиях модели могут оказаться в области, где преобладают силы сцепления. Физическое моделирование станет невозможным. Одним из способов преодоления этой трудности является поиск такого материала для использования на модели, плотность которого меньше плотности кварца [1, 2]. Доказано, что даже в случае больших размеров модели плотность материала, заменяющего песок на модели, должна незначительно отличаться от плотности воды. Это обстоятельство создает дополнительные трудности при проведении исследований. Остается еще один весьма затратный способ приближенного моделирования подобного рода явлений, предусматривающий проведение серии одних и тех же испытаний на подобных моделях разных линейных размеров.

Между тем в природе и в технике существуют материалы, которые в мелкозернистом состоянии не обладают сцеплением. К таким материалам относятся мелкодисперсные кварцевые порошки. Обладая малыми размерами частиц, они могут расширить возможности исследований местных размывов русла за водосбросами на равнинных реках.

Важная характеристика несвязных грунтов τ_0 — касательное напряжение, при достижении которого частицы грунта приходят в движение. В расчетах используется динамическая скорость потока, соответствующая началу движения частиц u_{*0} , связанная с касательным напряжением формулой: $u_{*0} = \sqrt{\tau_0/\rho}$, где ρ — плотность воды. В общем случае величину u_{*0} можно найти из критериального уравнения [3]:

$$\text{Re}_{*0} = a\text{Ar}^n, \quad (1)$$

где $\text{Re}_{*0} = u_{*0}d/v$ — число Рейнольдса; $\text{Ar} = gd^3\rho'/v^2$ — критерий Архимеда; d — средний размер частиц; v — коэффициент кинематической вязкости воды; $\rho' = \rho_1/\rho - 1$; ρ_1 — плотность вещества частиц; g — ускорение силы тяжести; a и n — параметры, зависящие от размера частиц грунта, для мелкозернистых песков при $0,1 \text{ мм} < d \leq 0,25 \text{ мм}$ $a = 0,502$ и $n = 0,35$.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что критериаль-

ное уравнение (1) с указанными параметрами a и n остается справедливым и для сыпучих мелкодисперсных грунтов. Из уравнения (1) получили:

$$u_{*0} = a\text{Ar}^n v/d. \quad (2)$$

Для перехода от динамической скорости u_{*0} к средней неразмывающей U_0 использовали одну из формул равномерного движения:

$$U_0 = u_{*0} \sqrt{\lambda/2}, \quad (3)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, который определяется при условии равномерного движения потока на рисберме и величиной абсолютной шероховатости поверхности рисбермы Δ .

Критериальное уравнение, связывающее глубину воронки местного размыва z_p с параметрами, ее определяющими, получено в следующем виде [1]:

$$z_p/h_2 = f(u_*/u_{*0}, \text{Fr}_1, n_3, l_k/h_2), \quad (4)$$

где $\text{Fr}_1 = u_1^2/gh_1$ — число Фруда в сжатом сечении; u_1 и h_1 — соответственно течения и глубина воды в этом сечении; $n_3 = h_2/h''$ — коэффициент затопления гидравлического прыжка; h_2 — глубина воды в нижнем бьефе в пределах рисбермы; h'' — вторая сопряженная глубина гидравлического прыжка (первая сопряженная глубина $h' = h_1$); l_k — длина бетонного крепления русла (рисбермы); u_* — динамическая скорость потока в пределах крепления.

Отмеченные параметры в уравнении (4) следует дополнить в пределах крепления двумя зависимостями: первая описывает связь средней скорости U с динамической u_* в виде формулы (3); вторая — связь коэффициента гидравлического трения с критерием Рейнольдса и относительной шероховатостью бетонной поверхности. Если моделирование осуществляется со строгим соблюдением геометрии сооружений и равенства коэффициентов гидравлического трения и чисел Фруда на модели и в натуре («по Фрудю»), то подобие потоков в пределах крепления русла будет обеспечено.

При равенстве коэффициентов гидравлического трения на модели и в натуре для первого параметра, содержащегося в правой части зависимости (4), справедлива формула $u_*/u_{*0} = U/U_0$. Отношение U/U_0 называется параметром подвижности наносов. Необходимо обеспечить равенство этого параметра на модели и в натуре, тогда относительные размеры глубин воронок местного размыва в натуре и на модели будут одинаковыми.

В дальнейших расчетах удобно использовать величину, обратную коэффициенту подвижности. Условие равенства параметра подвижности наносов (в дан-

ном случае обратного ему) в условиях натуре (индекс «н») и модели (индекс «м»): $(u_{*0}/u_*)_н = (u_{*0}/u_*)_м$. (5)

Заменили в (5) величины числами подобия, используя зависимость (2). Для того, чтобы отличить число Рейнольдса $Re_{*0} = u_{*0}d/v$, содержащего динамическую скорость потока, отвечающую началу трогания частиц u_{*0} , от числа Рейнольдса, в которое входит динамическая скорость потока u_* , обозначили его как $Re_* = u_*d/v$. Для числа Re_{*0} в дальнейшем использовали зависимость (1) от критерия Архимеда в общем виде. С учетом этих замечаний получили

$$u_{*0}/u_* = Re_{*0}/Re_* = aAr^n/Re_* \quad (6)$$

С учетом (6) равенство (5) примет следующий вид:

$$(aAr^n/Re_*)_н = (aAr^n/Re_*)_м \quad (7)$$

Разделив левую часть равенств (7) на правую, получили индикатор подобия $(aAr^n/Re_*)_н / (aAr^n/Re_*)_м = 1$. (8)

Преобразовали индикатор (8) таким образом, чтобы в него вошли отношения величин в натуре к сходственным величинам на модели. Эти отношения заменили масштабными коэффициентами. После преобразований индикатор подобия (8):

$$\left[\frac{a_n Ar_m^{n-n_m} k_g k_d^{3n-1} k_p^n}{a_m k_v^{2n-1} k_{u_*}} \right] = 1 \quad (9)$$

В нем индексы «н» и «м» относят постоянные и показатели степени соответственно к натуре и модели. В него входят масштабные следующие коэффициенты: $k_{u_*} = u_{*н}/u_{*м}$ – динамической скорости потока; $k_d = d_н/d_м$ – размеров частиц; $k_p = (\rho_1 - \rho)/\rho_н / (\rho_1 - \rho)_м$ – относительной плотности вещества частиц; $k_g = g_н/g_м$ – ускорения силы тяжести; $k_v = \nu_н/\nu_м$ – кинематической вязкости жидкости. В таком виде индикатор подобия (8) позволяет установить связь между масштабным коэффициентом размеров частиц k_d и линейным масштабным коэффициентом $k_1 = l_н/l_м$. Если опыты проводятся в поле сил земного тяготения, жидкость на модели та же, что и в натуре, а плотность вещества наносов одинакова, то $k_g = k_v = k_p = 1$. Кроме того, выполняется условие: $k_{u_*} = \sqrt{k_1}$.

Выполненные расчеты выявили следующие результаты. Допустим, на модели используется кварцевый порошок со средним размером частиц $d_м =$

0,005 мм, $a_м = 0,502$, $n_м = 0,35$. Нужно определить линейный масштаб модели при условии, что в натуре средний размер частиц грунта относится к переходной области, т. е. $d_н = 0,5$ мм. В этой области $a_н = 0,314$, $n_н = 0,432$ [3]. В этом случае линейный масштабный коэффициент получается равным 2...3, модель немногим отличается от натуре.

При тех же условиях на модели определили ее линейный масштаб при условии, что в натуре средний размер частиц грунта относится к области квадратичного сопротивления, т. е. $d_н = 5...6$ мм (гравий), то $a_н = 0,162$, $n_н = 0,5$ [3]. В этом случае $k_1 \leq 20$.

Выводы

Используя на модели приемлемых размеров мелкодисперсный кварцевый порошок, можно изучать образование воронки местного размыва, сходной с условиями в натуральных гравийных грунтах. С тем, чтобы подобного рода исследования можно было переносить в натурные песчаные грунты, необходим поиск сыпучих материалов, обладающих прочностью кварца, но малой по сравнению с кварцем плотностью.

1. Михалев М. А. Защита территории от эрозии. Защита речного русла и гидротехнических сооружений: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 119 с.

2. Михалев М. А. О моделирование местного размыва русла за водосбросными плотинами // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 2. – С. 67–75.

3. Михалев М. А. О моделировании условий начала трогания частиц несвязного зернистого материала // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009. – Выпуск 1. – С.43–50.

Материал поступил в редакцию 16.06.2014.

Михалев Михаил Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство»

E-mail: mikhalev@cef.spbstu.ru

Тел. 8 (812) 535-46-10